



Análise CA para o TBJ

Objetivo da Aula

- Conhecer o modelo r_e aplicado na representação do TBJ à análise CA.

Conteúdo Programático

- Modelo r_e ;
 - Para emissor-comum;
 - Para base-comum;
 - Para coletor-comum;

- Aplicação para configuração emissor-comum.

Construção de Conhecimento esperado



- Após esta aula, o aluno deverá ser capaz de compreender e aplicar o modelo r_e para análise CA do TBJ a pequeno sinal.

Modelos

■ Polarização

- Preparação para o transistor operar.
 - Região de operação
 - Ativa;
 - Corte;
 - Saturação.

■ Amplificação

- Injeção de sinais alternados (AC) para amplificação
 - V_{in} - sinal de entrada
 - V_{out} - sinal de saída

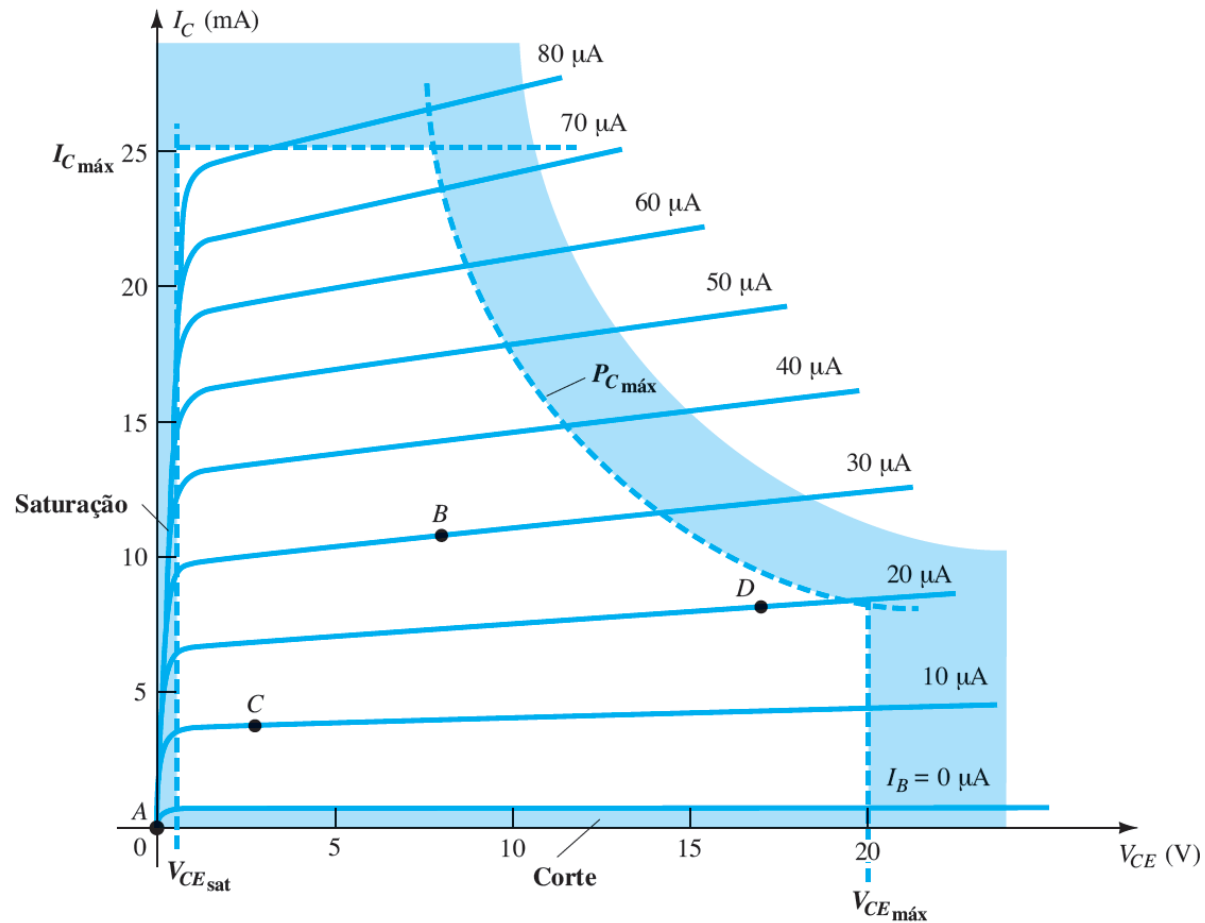
Modelos

■ Amplificação

- Sinal de baixa amplitude é convertido em sinal de alta amplitude.
 - Energia é fornecida pela fonte DC que alimenta o circuito transistorizado.
- Após polarização do transistor
 - Estabelece-se ponto de operação para amplificação.
 - Usa-se modelo representativo do transistor para facilitar análise de amplificação (análise AC).

Modelos

■ Amplificação



Modelos

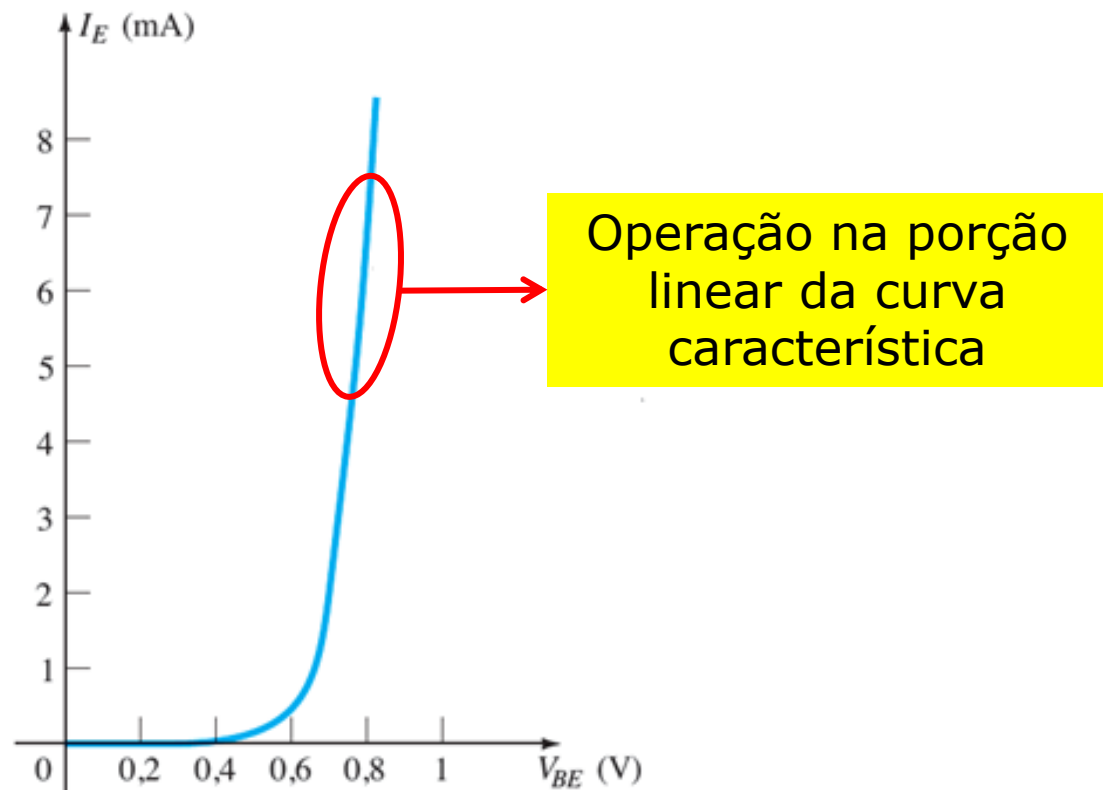
- Amplificação

- Modelagem do transistor

- Substituição do transistor por um conjunto de componentes mais simples (diodos, resistores, capacitores, etc.) para facilitar a compreensão do seu funcionamento nas condições de operação (polarização).

Modelos

- Análise em pequeno sinal
 - Exemplo base-comum



Modelos

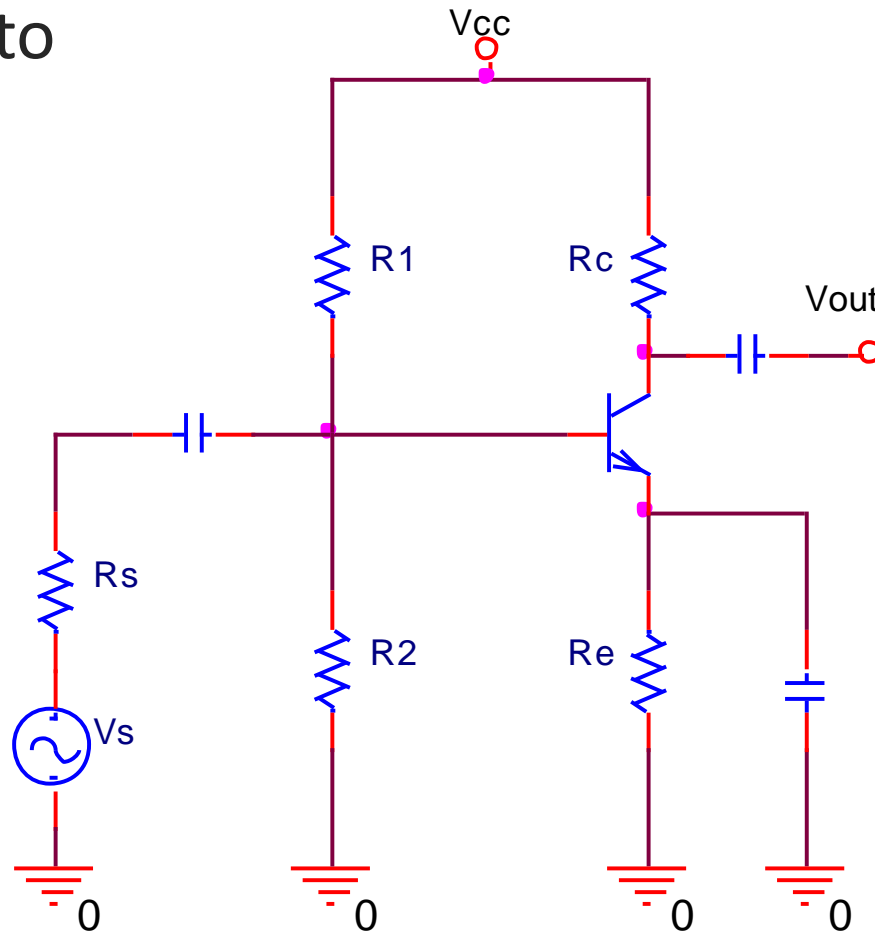
■ Amplificação

– Ação dos capacitores

- Na polarização - circuito aberto
 - Análise DC;
 - Somente fontes DC ativadas.
- Na amplificação - curto-circuito
 - Análise AC;
 - Somente fontes AC ativadas;
 - Capacitâncias escolhidas para garantir um curto-circuito efetivo para uma faixa de frequências;
 - Lembrar: $X_c = 1/(j\omega C)$.

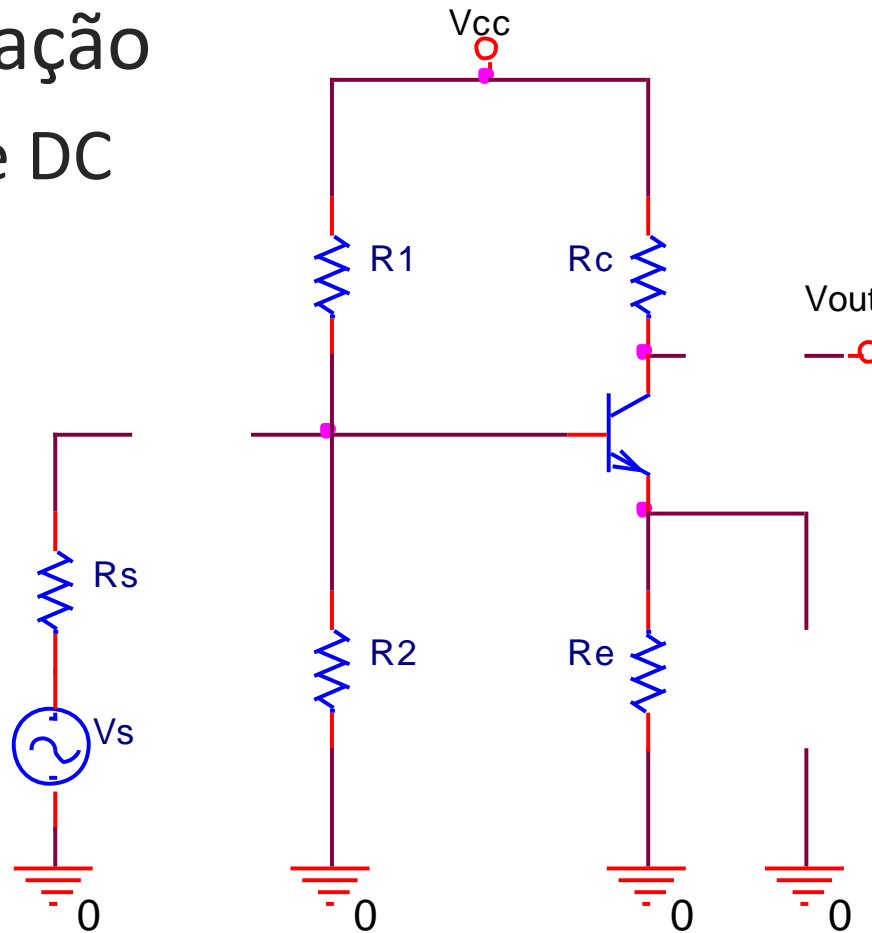
Modelos

- Amplificação
– Completo



Modelos

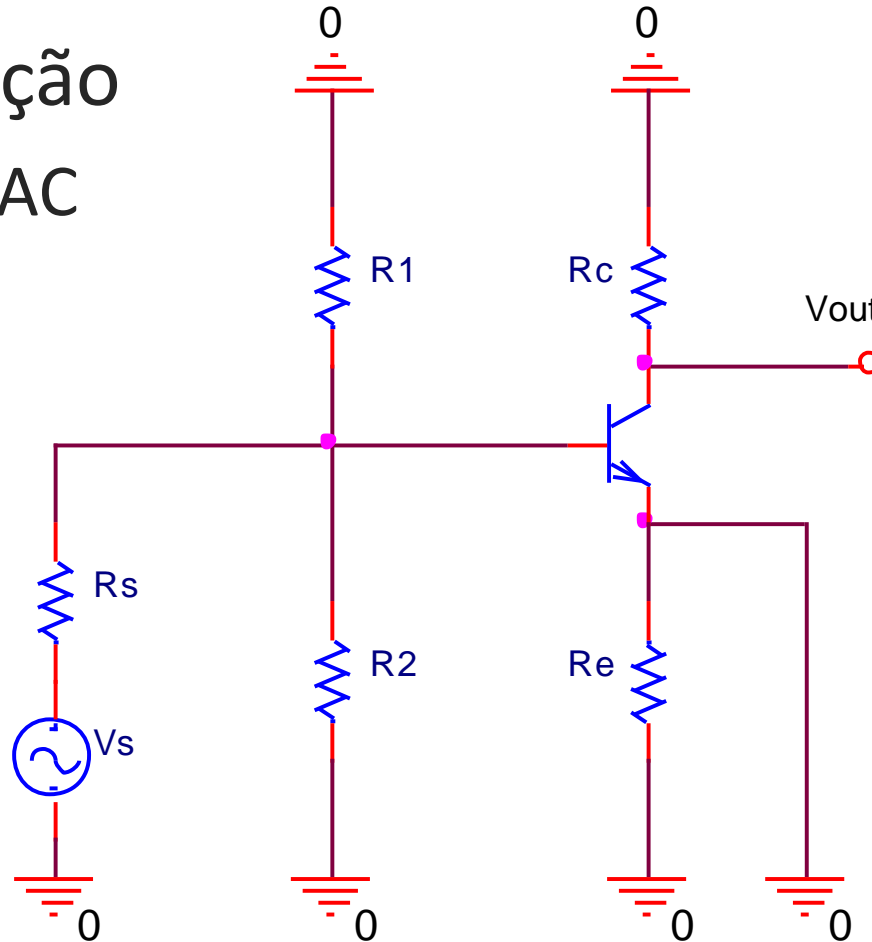
- Amplificação
– Análise DC



Determinar as grandezas de polarização de interesse (I_C , V_{CE} , etc.)

Modelos

- Amplificação
– Análise AC



Determinar as grandezas de interesse (I_i , I_o , Z_i , etc.)

Modelos

- O que torna possível a análise de circuitos com TBJ dessa forma?

“O teorema da superposição é aplicável à análise e ao projeto das componentes CC e CA de um circuito contendo TBJ, permitindo a separação da análise das respostas CC e CA.”

Modelos

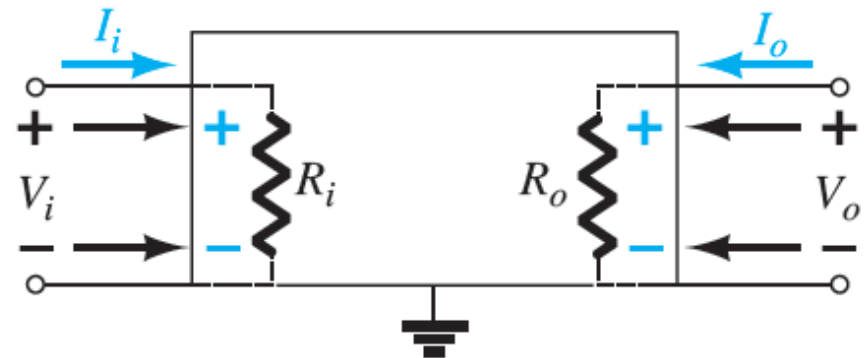
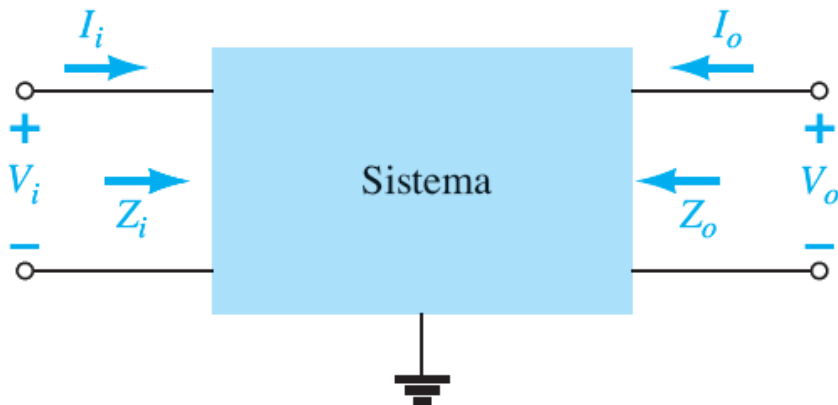
■ Obtenção do equivalente CA para o TBJ

- 1 Substituir as fontes de tensão CC por um curto-circuito.
- 2 Substituir todos os capacitores por um curto-circuito.
- 3 Remover todos os elementos que ficaram em paralelo com os curtos-circuitos introduzidos.
- 4 Redesenhar o circuito de modo conveniente.

Modelos

- Análise AC
 - Circuito equivalente para análise AC

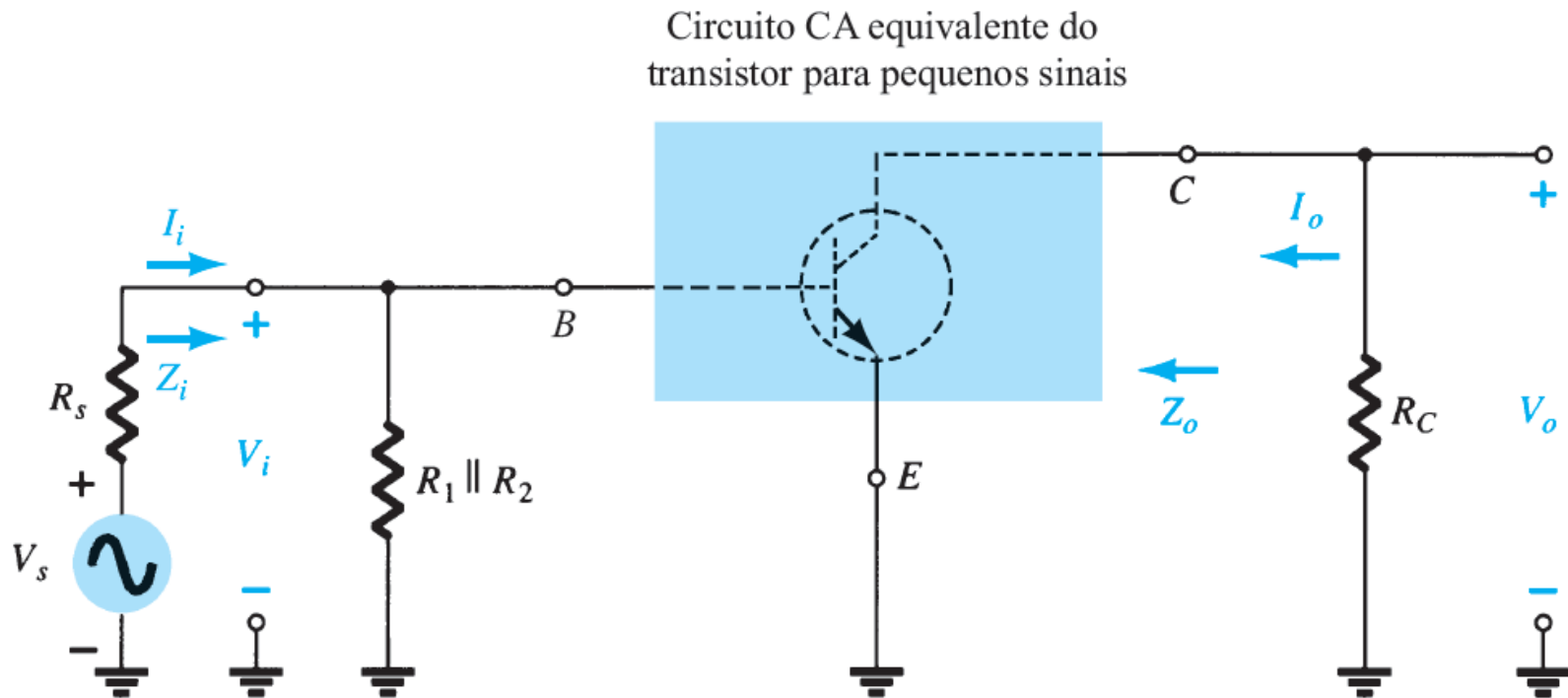
Definição dos parâmetros



Polaridade e sentido das correntes

Modelos

- Análise AC
 - Circuito equivalente para análise AC



Modelos

- Amplificação (grandezas de interesse)
 - Impedância de entrada
 - $Z_{in} = V_{in} / I_{in}$
 - Impedância de saída
 - $Z_{out} = V_{out} / I_{out}$
 - Ganho de tensão
 - $A_v = V_{out} / V_{in}$
 - Ganho de corrente
 - $A_i = I_{out} / I_{in}$
 - Obs: **V_{in} , V_{out} , I_{in} , I_{out} são senoidais!**

Modelos

■ Amplificação

– Impedância de entrada

- Cuidado com casamento de impedância
 - Garantir que $V_s \approx V_{in}$
- Deve ser elevada
 - Máximo de tensão alimente amplificador

– Impedância de saída

- “Impedância observada nos terminais de saída quando os terminais de entrada são curto-circuitados”

Modelos

■ Amplificação

– Ganho de tensão

- Medido sem carga (circuito aberto na saída)
- A_v sem carga $>$ A_v com carga

– Ganho de corrente

- Medido com carga
 - Precisamos de corrente fluindo na saída.

Análise do Modelo r_e

“O modelo r_e é o mais popular pois, tem a vantagem de que os parâmetros utilizados (r_e , r_o , β) são definidos pelas condições reais de operação.”

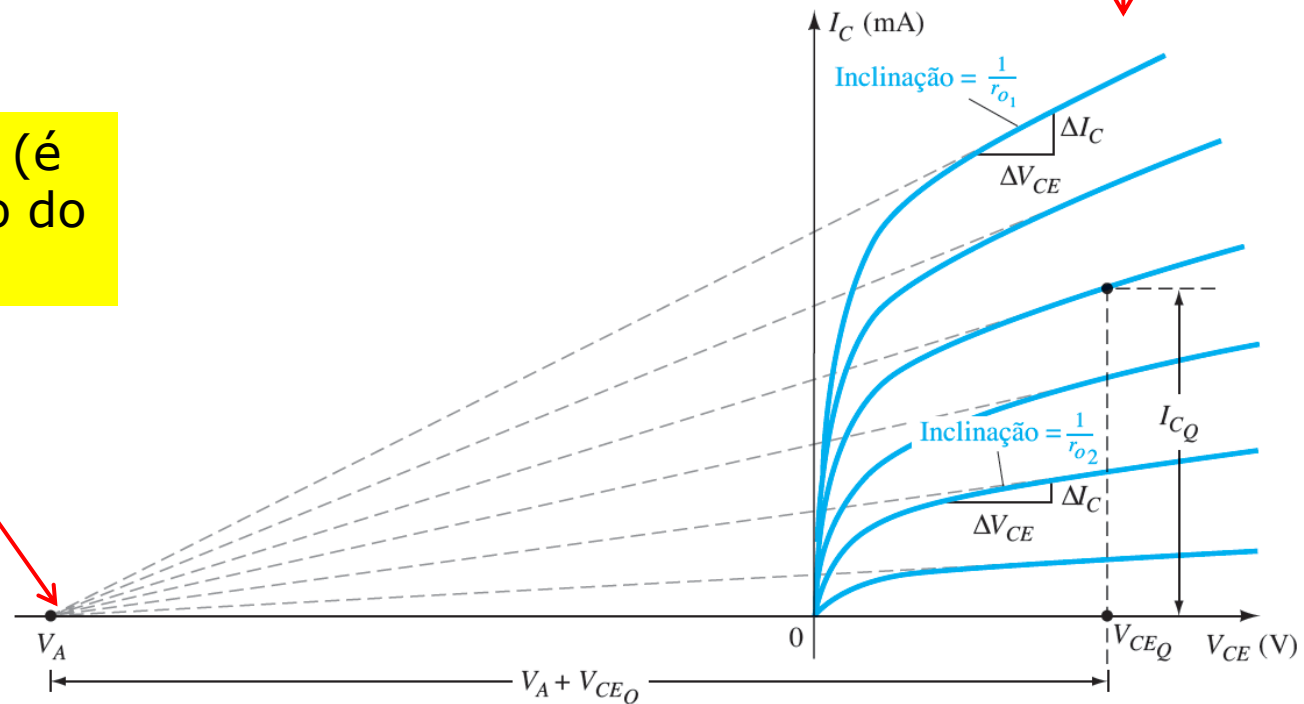
Modelos

■ Modelo r_e

– Caracterizando a impedância de saída:

I_b aumenta – Aumento da inclinação – diminui a impedância de saída

Tensão *Early* (é um parâmetro do TBJ)



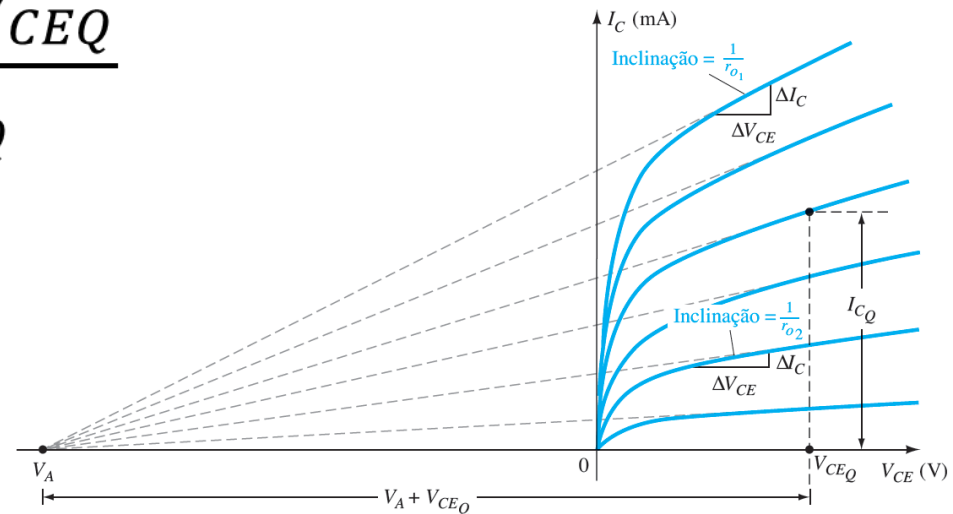
Modelos

- Modelo r_e
 - Caracterizando a impedância de saída:

$$r_o = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_A + V_{CEQ}}{I_{CQ}}$$

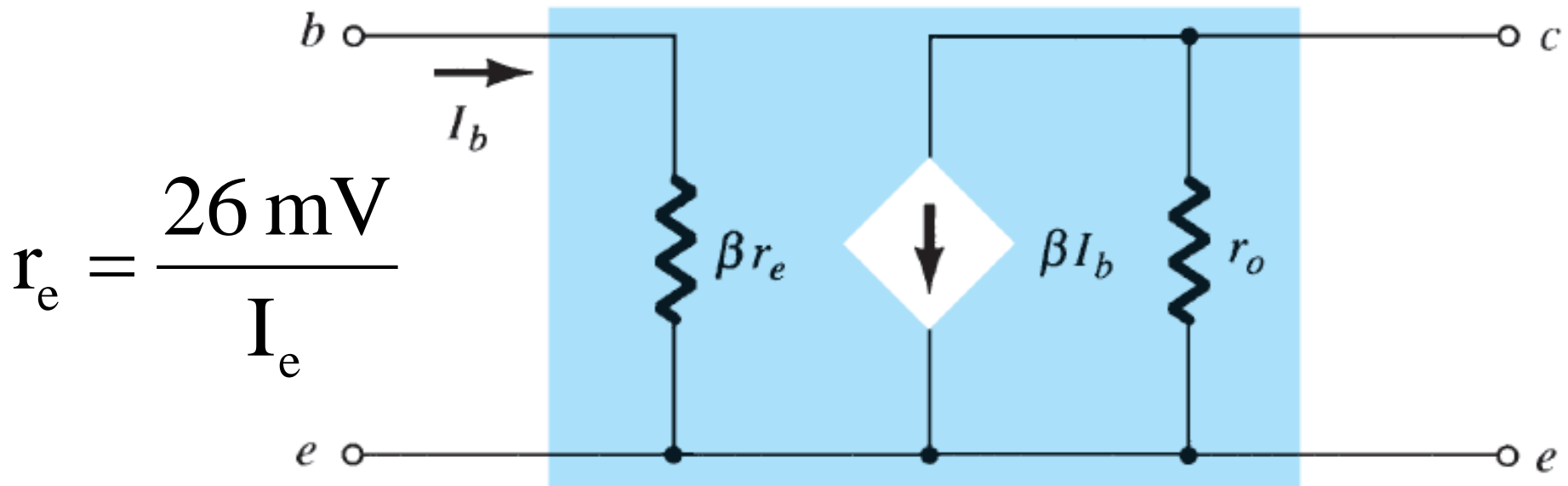
– Como $V_A \gg V_{CEQ}$

$$r_o \cong \frac{V_A}{I_{CQ}}$$



Modelos

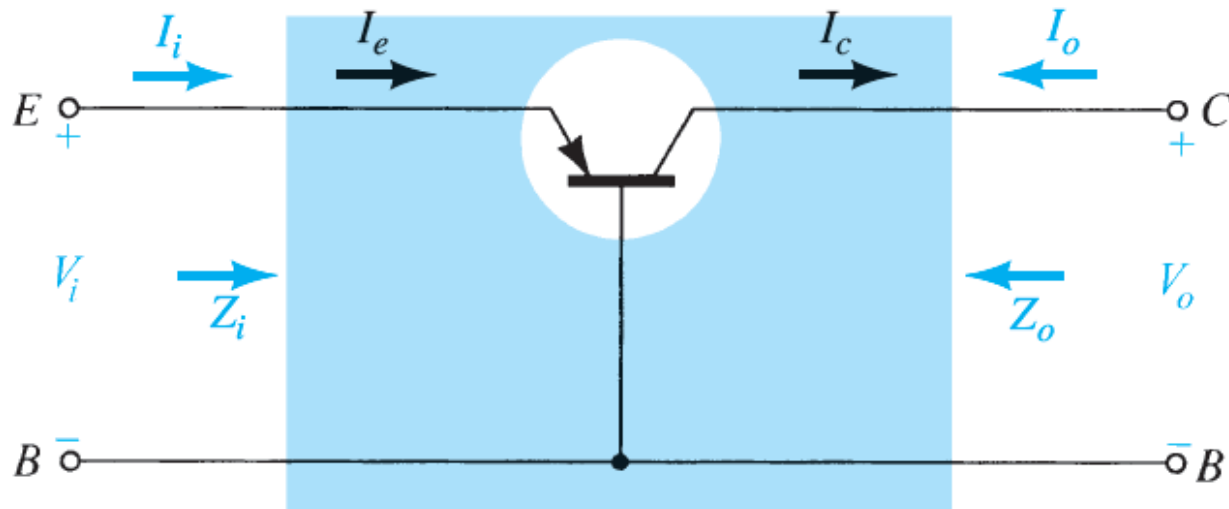
- Modelo r_e
 - Portanto o modelo completo r_e para a configuração emissor-comum é:



Modelos

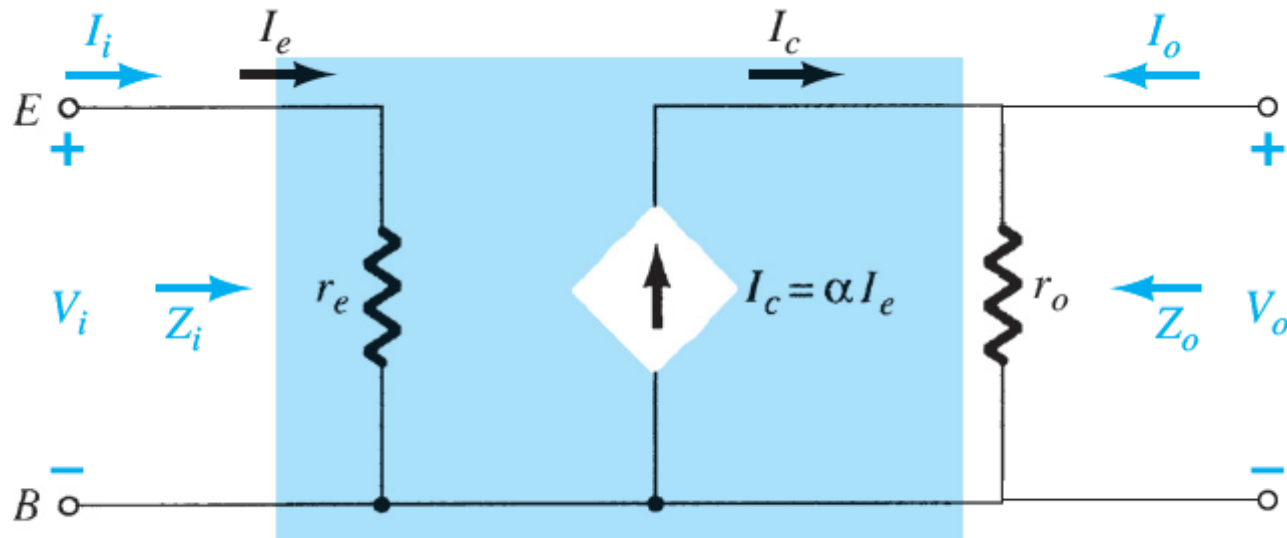
■ Modelo r_e

- Para a configuração base-comum, o desenvolvimento do modelo é análogo ao emissor-comum:



Modelos

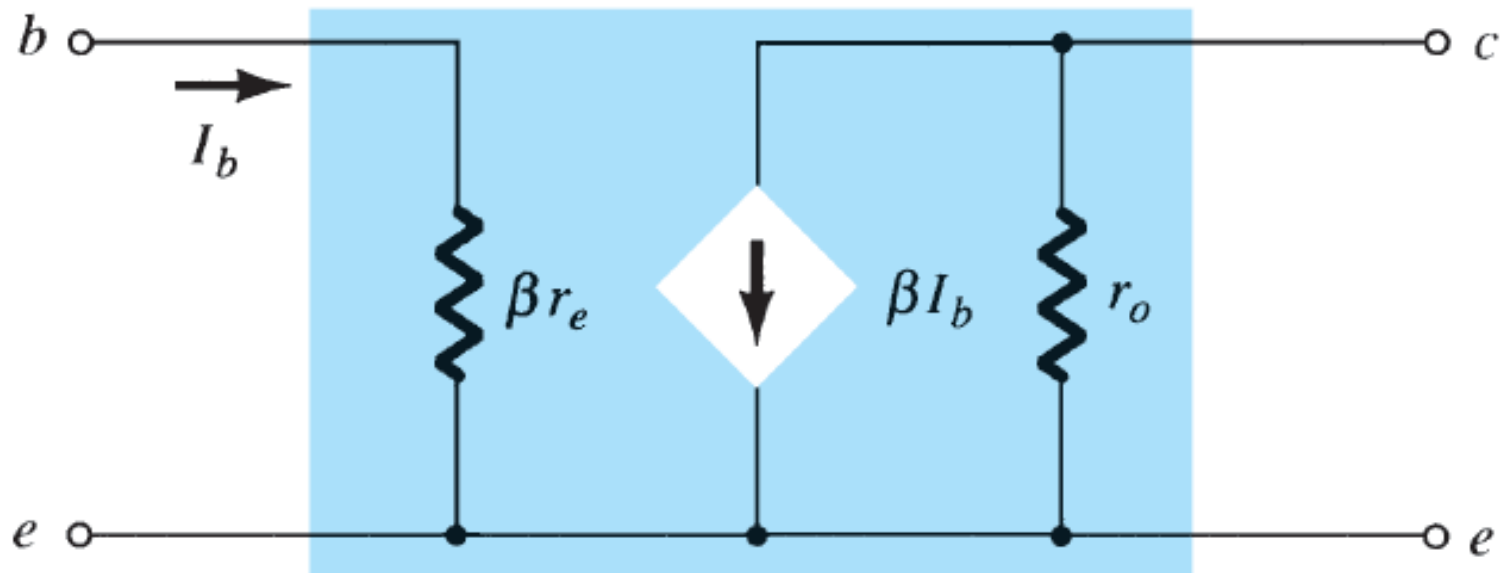
- Modelo r_e
 - Modelo completo para a configuração Base-Comum:



Impedância de entrada baixa – basicamente R_e
Impedância de saída elevada

Modelos

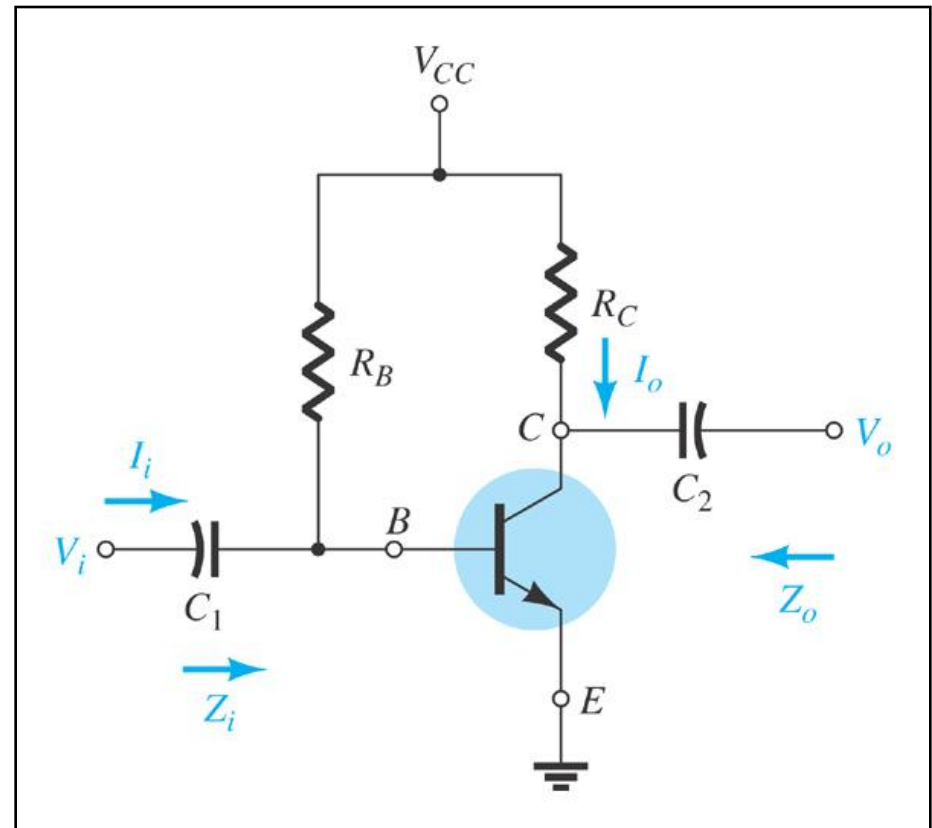
- Modelo r_e
 - Configuração coletor-comum
 - É similar ao modelo desenvolvido para a configuração emissor-comum.



Análise do Modelo r_e

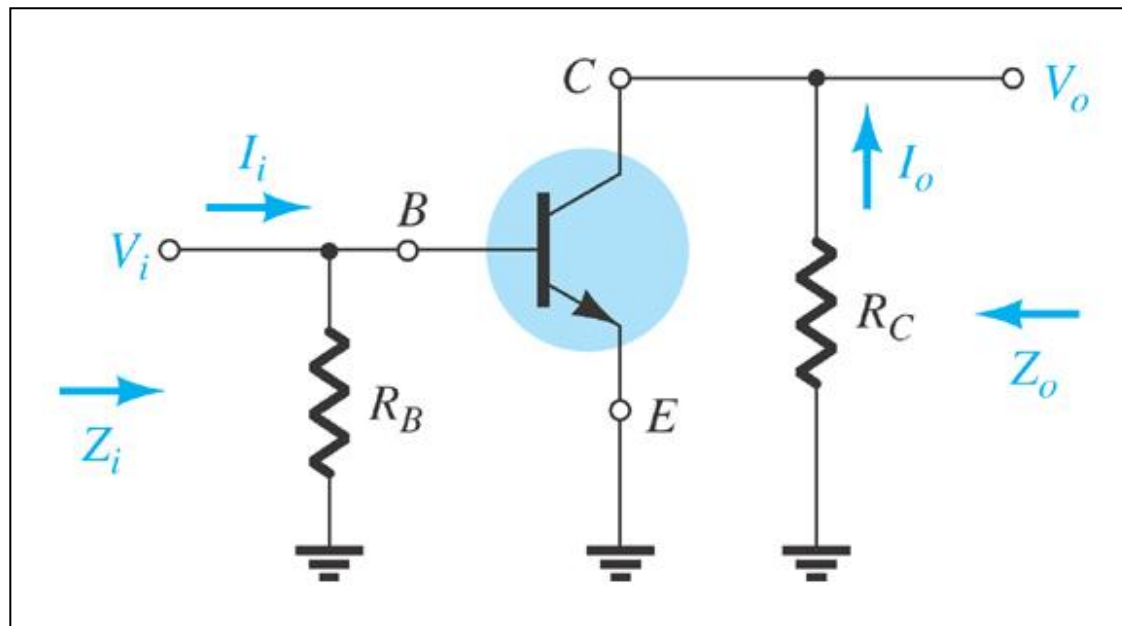
■ Para polarização fixa

- A entrada é aplicada à base
- A saída é retirada do coletor



Análise do Modelo r_e

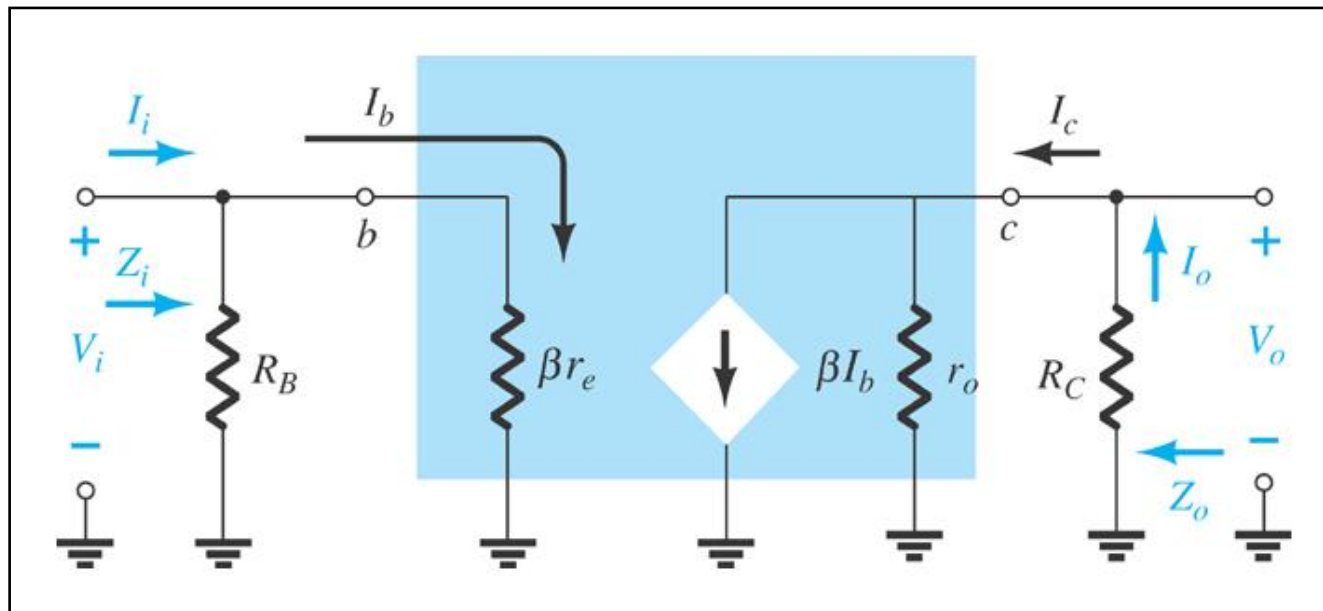
- Para polarização fixa
 - Circuito equivalente para análise CA



CA equivalente

Análise do Modelo r_e

- Para polarização fixa
 - Circuito equivalente para análise CA



Modelo r_e

Análise do Modelo r_e

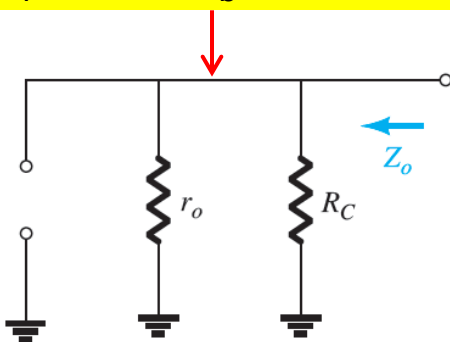
- Para polarização fixa
 - Grandezas de interesse

Impedância de entrada:

$$Z_i = R_B || \beta R_e$$

$$Z_i \cong \beta R_e \Big|_{R_B \geq 10 r_e}$$

Determinada com $V_i = 0V$ – $I_b = 0A$



Impedância de saída:

$$Z_o = R_C || r_o$$

$$Z_o \cong R_C \Big|_{r_o \geq 10 R_C}$$

Ganho de tensão:

$$V_o = -\beta I_b (R_C || r_o) \quad (1)$$

$$I_b = \frac{V_i}{\beta r_e} \quad (2)$$

Substituindo (2) em (1):

$$V_o = -\beta \left(\frac{V_i}{\beta r_e} \right) (R_C || r_o)$$

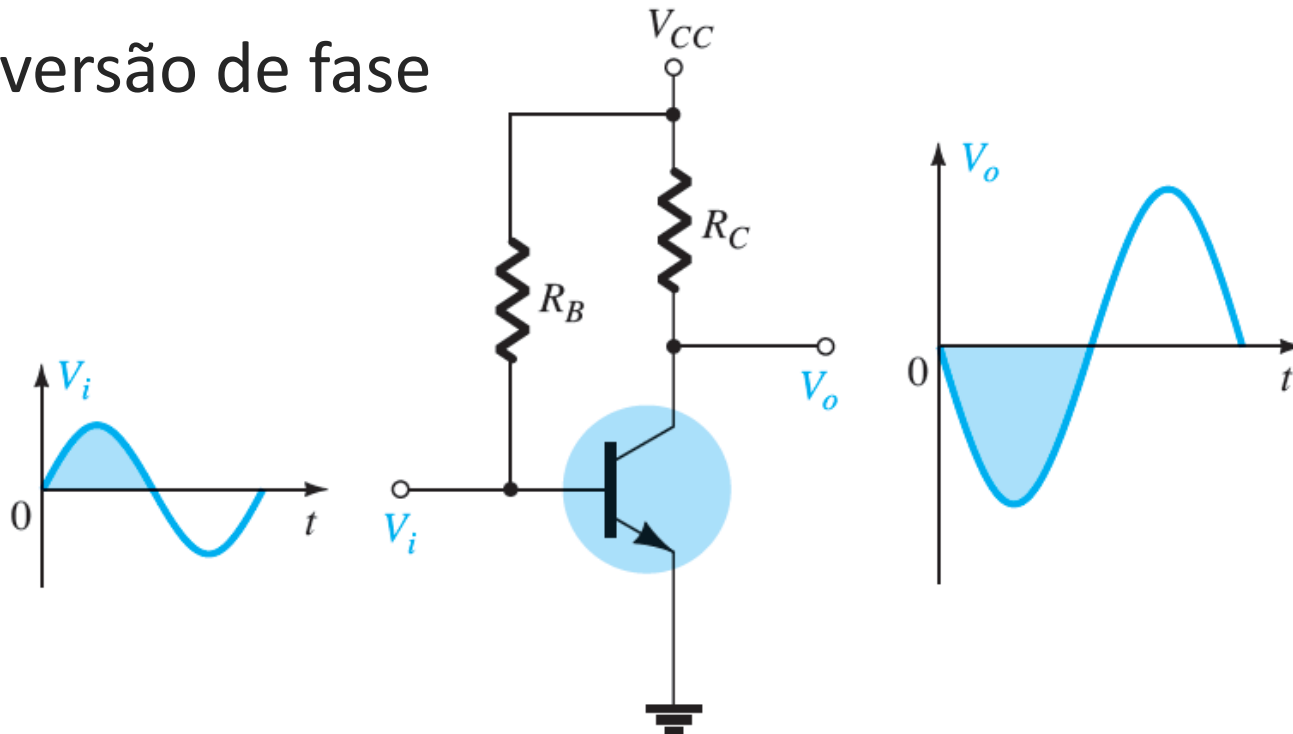
$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = - \frac{(R_C || r_o)}{r_e}$$

$$A_v = - \frac{R_C}{r_e} \Big|_{r_o \geq 10 R_C}$$

Inversão de fase

Análise do Modelo r_e

- Para polarização fixa
 - Inversão de fase



βI_B estabelece uma corrente através de R_C que resultará em uma tensão sobre R_C que é o posto da convenção adotada para V_o .

Análise do Modelo r_e

- Para polarização fixa
 - Grandezas de interesse – Ganho de corrente

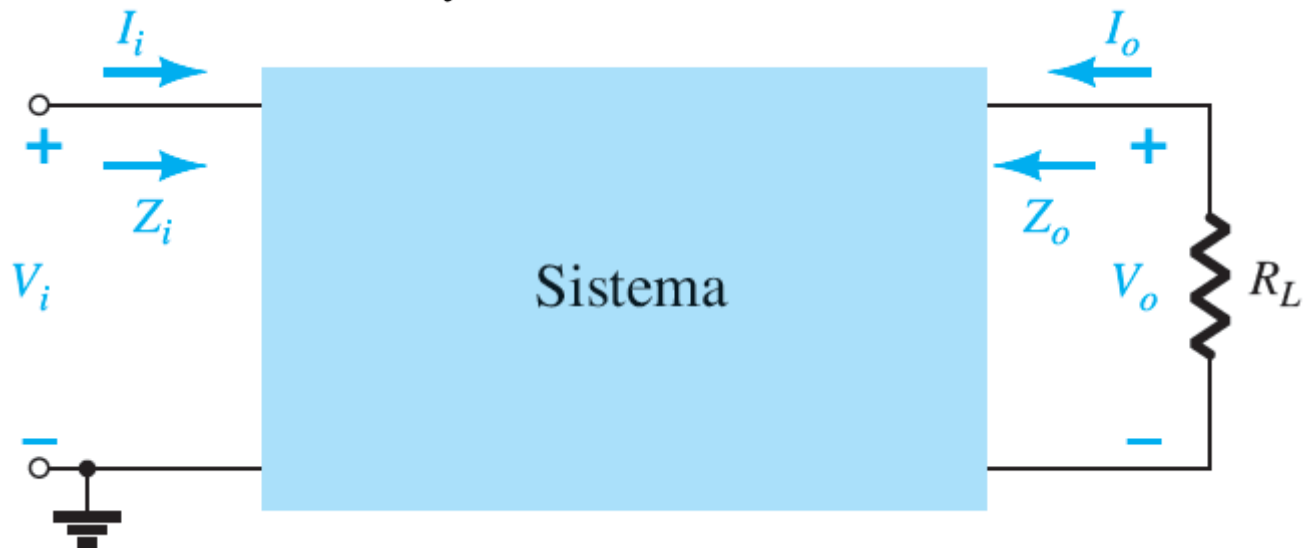
Definição ganho corrente:

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} \quad (1)$$

Lei de Ohm a entrada e saída:

$$I_i = \frac{V_i}{Z_i} \quad (2)$$

$$I_o = -\frac{V_o}{R_L} \quad (3)$$



Sentido de corrente oposto ao indicado.

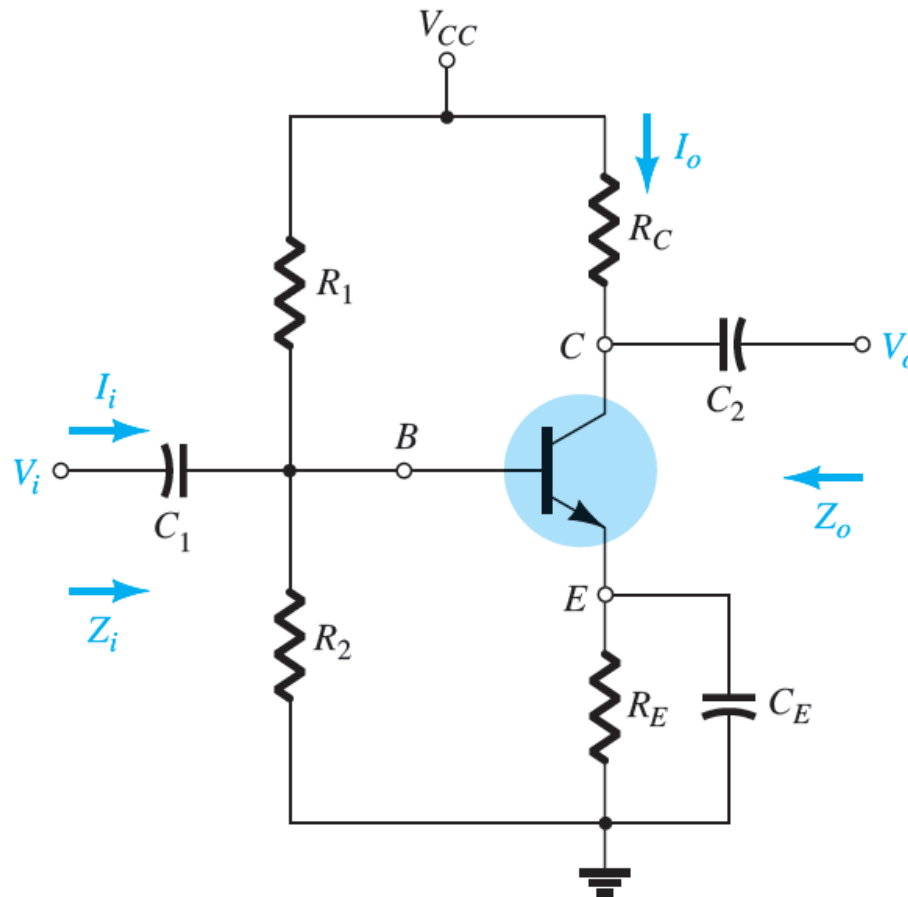
Análise do Modelo r_e

- Para polarização fixa
 - Grandezas de interesse – Ganho de corrente
 - Substituindo (2) e (3) em (1):

$$A_i = -\frac{V_o}{V_i} \times \frac{Z_i}{R_L} = -A_V \frac{Z_i}{R_L}$$

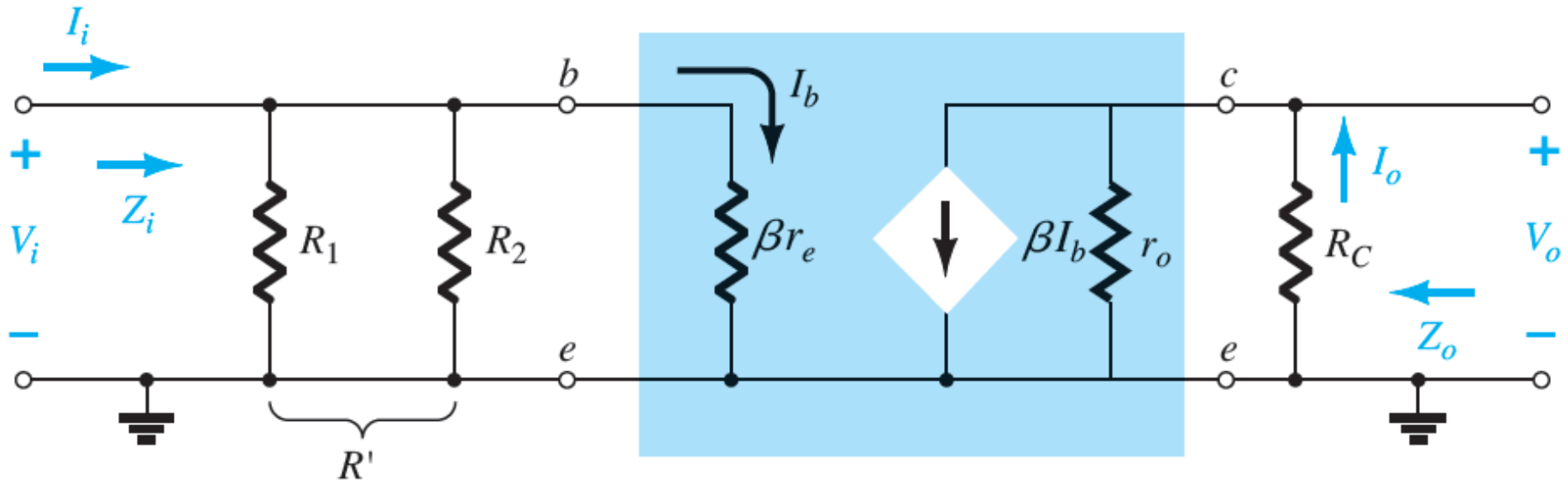
Análise do Modelo r_e

- Para polarização por divisor de tensão



Análise do Modelo r_e

- Para polarização por divisor de tensão



Análise do Modelo r_e

- Para polarização por divisor de tensão
 - Grandezas de interesse

Impedância de entrada

$$R' = R_1 \parallel R_2$$

$$Z_i = R' \parallel \beta r_e$$

Impedância de saída

$$Z_o = R_C \parallel r_o$$

$$Z_o \cong R_C \Big|_{r_o \geq 10R_C}$$

Ganho de tensão:

$$V_o = -\beta I_b (R_C \parallel r_o) (1)$$

$$I_b = \frac{V_i}{\beta r_e} (2)$$

Ganho de corrente

Substituindo (2) em (1):

$$V_o = -\beta \left(\frac{V_i}{\beta r_e} \right) (R_C \parallel r_o)$$

Inversão de fase

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = - \frac{(R_C \parallel r_o)}{r_e}$$

$$A_v = - \frac{R_C}{r_e} \Big|_{r_o \geq 10R_C}$$

$$A_i = - \frac{V_o}{V_i} \times \frac{Z_i}{R_L} = -A_v \frac{Z_i}{R_L}$$

Referências Utilizadas

- BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos. 11. ed.** São Paulo: Pearson education do Brasil, 2013.
- SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C.. **Microeletrônica. 5ed.** São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.
- MALVINO, Albert Paul. **Eletrônica. 4. ed.** São Paulo: Makron, c1997. 2v.



Obrigado pela Atenção!

Prof. Dr. Ulisses Chemin Netto – ucnetto@utfpr.edu.br
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT – (41)3310-4626
Av. Sete de Setembro, 3165 - Bloco D – Rebouças - CEP 80230-901
Curitiba - PR - Brasil